

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЛАЗНЕНКО ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 66.021.3+66.048.3

**РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ АПАРАТІВ  
ДЛЯ ПРОЦЕСІВ РЕКТИФІКАЦІЇ**

Спеціальність 05.17.08. – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми – 2001.

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник**

доктор технічних наук, професор

**Пляцук Леонід Дмитрович**

завідувач кафедри прикладної

екології СумДУ

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Мальований Мирослав Степанович**, професор кафедри хімічної інженерії та промислової екології національного університета Львівська політехніка;

кандидат технічних наук **Вакал Сергій Васильович**, заступник директора з наукової роботи державного НДІ мінеральних добрив і пігментів державного комітету промислової політики України, м.Суми.

**Провідна установа**

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”  
м. Харків.

Захист відбудеться “ 26 ” червня 2001 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 у Сумському державному університеті (40007, м.Суми, вул. Римського-Корсакова,2)

Автореферат розісланий “ 23 ” травня 2001 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради \_\_\_\_\_ Є.М.Савченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема охорони навколишнього середовища та переробки виробничих відходів на сьогоднішній день є особливо актуальною.

В нафтопереробній та спиртовій промисловості часто в вигляді відходів видаляються групи речовин, які негативно впливають на якість продукції. Обсяг цих речовин порівняно невеликий, але вони можуть являтися сировиною для одержання цінних цільових продуктів. При їх переробці виникає необхідність в високоінтенсивному масообмінному обладнанні невеликої потужності.

Одним із шляхів вирішення поставленої задачі є організація взаємодії фаз у полі відцентрових сил. Даний спосіб конструктивно реалізується в роторних ректифікаційних апаратах (РРА), в яких можна досягти високого ступеню поділу при невеликих габаритних розмірах, енергетичних витратах та низькій металоємності устаткування. Зокрема, конструкція роторного ректифікаційного апарата з контактним пристроєм в вигляді перфорофаного ротора, усередині якого розташований шар насадки, дозволяє досягти найбільш високого ступеня поділу при збереженні стійкості роботи в широкому діапазоні навантажень по фазах і режимних параметрів.

Залежності, отримані різними авторами при вивченні масообміну і гідродинаміки взаємодії фаз у полі відцентрових сил не придатні для розрахунку і проектування РРА в силу істотного розходження гідродинамічної обстановки в апаратах різних конструкцій. Це викликає необхідність досліджень РРА і створення інженерної методики розрахунку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась по плану науково-дослідних робіт кафедри Прикладної екології Сумського державного університету, пов'язаних з тематикою «Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології», що відповідає науково-технічній програмі Міністерства освіти та науки України ( № держреєстрації 0194U029586), а також державній науково-технічній програмі 5.53.10 “Нетрадиційні види мінеральної сировини. Пошук, оцінка, видобування та використання” (№ держреєстрації 0193U040347), яка фінансується державним комітетом України по питанням науки та технологій.

Мета і задачі дослідження. Метою є розробка та дослідження високоінтенсивного роторного апарата, який має низьку енергомісткість, для проведення процесу ректифікації на основі використання закономірностей руху взаємодіючих фаз в відцентровому полі. Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- розробка фізичної моделі взаємодії фаз у зоні контакту РРА;

---

\* У керівництві роботою приймав участь к.т.н. Шевченко О.С.

- одержання на основі розробленої фізичної моделі замкнутої системи рівнянь, що зв'язують основні гідродинамічні і режимні параметри РРА;
- одержання аналітичних залежностей в результаті рішення й аналізу рівнянь;
- перевірка і уточнення отриманих теоретичних залежностей експериментальним шляхом;
- створення методики розрахунку і проектування РРА, а також визначення основних вимог пропонованих до РРА при роботі на основі експериментальних і теоретичних залежностей;
- дослідно-промислова апробація та впровадження розробленого апарата в промисловість.

*Об'єктом дослідження* є інтенсифікація процесу ректифікації в відцентровому полі.

*Предметом дослідження* є розробка та дослідження малогабаритних апаратів для процесу ректифікації.

*Методи досліджень* ґрунтуються на використанні математичного апарату планування експерименту, математичної статистики, фізичного моделювання процесів, які досліджуються. Математичну модель процесу було реалізовано на ПЕОМ. В роботі використовувались оптичні методи для дослідження гідродинаміки, фізико-хімічні та газохроматографічні методи для якісного та кількісного аналізу складів багатокомпонентних сумішей.

Наукова новизна отриманих результатів. Розроблено математичну модель руху рідини в контактному пристрої РРА з урахуванням сил Коріоліса. Отримана епюра розподілу швидкостей рідини по радіусу контактної пристрою. Встановлені закономірності розподілу рідкої фази в шарі насадки РРА і граничні режими роботи РРА. Отримано залежності для визначення гідравлічного опору та масообмінних характеристик РРА.

Практичне значення отриманих результатів. На базі отриманих залежностей для визначення масообмінних і гідродинамічних характеристик розроблена інженерна методика розрахунку РРА. За розробленою методикою зроблено розрахунок дослідно-промислової установки для розгонки ефіро-альдегідної фракції. Установка виготовлена і випробувана в умовах ДП “Будильський експериментальний завод” (с. Будилка, Сумська обл.).

Особистий внесок дослідника. Розроблена математична модель взаємодії фаз у зоні контакту РРА і отримано рішення системи диференціальних рівнянь [4]; визначені закономірності розподілу рідкої фази в контактному пристрої РРА [8]; розроблені нові контактні пристрої для РРА [5, 6, 11, 12, 15]; проведений аналіз залежності ефективності роторних апаратів від розмірів контактної пристрою і рішення задачі вирівнювання гідродинаміки РРА [9]; одержані залежностей для визначення гідравлічного опору РРА [10]; розроблена математична модель руху рідини на ділянці стабілізації на вході в контактний пристрій РРА [7].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися і обговорювалися на IV і V Українських науково-технічних конференціях “Гідромеханіка в інженерній практиці” (м. Суми 1999, м. Київ 2000), науково-технічній конференції “Екологія і здоров'я людини. Охорона водного і повітряного басейнів. Утилізація відходів.” (м. Щелкіно АР Крим 1999); на науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів Сумського державного університету (м. Суми 1998, 2000, 2001).

Публікації. За результатами роботи опубліковано 4 статті, тези 7 доповідей на конференціях, 2 заявки на винахід та отримано 3 деклараційних патенти України.

Структура дисертації. Робота складається з вступу, шести розділів та додатків. Повний обсяг роботи складає 151 сторінку. Дисертаційна робота містить 43 рисунки та 9 таблиць по тексту, 11 додатків на 18 сторінках, список використаних літературних джерел в кількості 101 найменувань на 9 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовані мета та задачі досліджень, їх наукова новизна та практичне значення, подана загальна характеристика роботи, анотація основних результатів, інформація про апробацію та впровадження роботи, перелік публікацій.

В першому розділі приведено огляд літератури і вибір основних напрямків дослідження. На основі патентно-ліцензійного пошуку та літературного огляду був проведений аналіз досліджень і розробок інтенсивних апаратів роторного типу та процесів тепло масообміну в відцентровому полі. Роторні масообмінні апарати дають можливість інтенсифікувати процеси за рахунок створення розвиненої поверхні контакту фаз і додаткового підведення до системи механічної енергії. Аналіз способів створення міжфазної поверхні та методів розрахунку РРА дозволив виявити, що в плівкових апаратах інтенсифікація процесів переносу маси відбувається за рахунок виникнення вихорів Тейлора. В розпилювальних РРА інтенсифікація процесів масообміну досягається за рахунок створення високорозвиненої поверхні контакту фаз. Розглянуті методи визначення гідравлічного опору з врахуванням впливу відцентрового поля та зрощення контактного пристрою дозволили прийняти за основу підхід, запропонований Александровським\*.

В другому розділі приведена фізична картина та математична модель взаємодії фаз у відцентровому полі в контактному пристрої РРА (рис.1).

---

\* Александровский А.А. Исследование гидродинамики и массообмена в роторном абсорбере: Дис...канд.Техн.наук: 05.17.08 – Казань, 1982 – 239с.

При роботі РРА рідка фаза подається на внутрішню поверхню контактної пристрою. Внаслідок сил тертя вона захоплюється в обертальний рух і під дією відцентрових сил рухається до його периферії. На рідину, що рухається, діє відцентрове прискорення (100-1000)g, що збільшується по радіусу контактної пристрою. Парова фаза рухається протитоком до рідкої, а величина опору пари збільшується по напрямку до центра контактної пристрою. Величина поверхні контакту фаз залежить від питомої поверхні насадки і швидкості оновлення поверхні плівки рідини.

Відцентрове поле, що діє на рідину, приводить до максимального зменшення товщини плівки рідини, збільшення площі контакту взаємодіючих фаз і, отже, до інтенсифікації масообміну в РРА. Високі силові поля також створюють сприятливі умови для проведення масообмінних процесів у стійкому режимі при високих навантаженнях РРА по фазах.

Фізична картина взаємодії фаз в роторному ректифікаційному апараті дозволила створити математичну модель руху рідини в контактній пристрої з урахуванням сили Коріоліса, відцентрової сили інерції, сили опору насадки, сили опору газової фази та сили, обумовленої реакцією насадки на дію Коріолісових сил (рис.2). Для цього був розглянутий рух елементарного об'єму рідини як відносний в рухомій циліндричній системі координат, яка обертається зі швидкістю, рівною швидкості ротора.

Диференціальне рівняння відносного руху рідини в векторній формі має вигляд:

$$m_p \frac{dw}{dt} = \sum \bar{F} + \bar{F}_{вц} + \bar{F}_к + \bar{F}_с . \quad (1)$$

Використовуючи скалярні величини сил представлених на (рис.2.б) рух рідини, може бути описаний у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_p \left( \frac{dw_r}{dt} - \frac{w_\varphi^2}{r} \right) = m_p \omega^2 r + 2m_p \omega w_\varphi - 2K_{pH} m_p \omega w_\varphi - \\ - m_p K_{он.r} w^2 - K_{oz} m_z (w_r'')^2 - \mu_p \nabla^2 w_r dr d\varphi dz \\ m_p \left( \frac{dw_\varphi}{dt} + \frac{w_\varphi w_r}{r} \right) = -2m_p \omega w_r + 2K_{pH} m_p \omega w_r - \\ - m_p K_{он.\varphi} w^2 - \mu_p \nabla^2 w_\varphi dr d\varphi dz \\ m_p \frac{dw_z}{dt} = -\mu_p \nabla^2 w_z dr d\varphi dz \end{array} \right. \quad (2)$$

і рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w_z}{\partial z} + \frac{w_r}{r} = 0. \quad (3)$$

Граничні умови:

$$\begin{aligned} r = r_0; \quad w_r = w_{r_0}; \quad w_\varphi = 0; \quad w_z = 0; \\ r = \infty; \quad w_r = 0; \quad w_\varphi = w_{\varphi.\infty}; \quad w_z = 0; \\ z = 0; \quad w_r = 0; \quad w_\varphi = 0; \quad w_z = 0; \\ z = \delta; \quad w_r = w_{r.\delta}; \quad w_\varphi = w_{\varphi.\delta}; \quad w_z = w_{z.\delta}. \end{aligned}$$

На основі подібного перетворення диференційних рівнянь руху рідини отримані два безрозмірних критерії:

критерій  $S$  (характеризує відношення сил опору насадки до сил інерції):

$$S = K_{on} r; \quad (4)$$

критерій  $Z$  (характеризує відношення відцентрових сил до сил опору газу):

$$Z = \frac{1}{K_{oz}(R - r_0)} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_z} \cdot \left( \frac{\omega r}{w_{z,r}} \right)^2. \quad (5)$$

Рішення математичної моделі одержано в критеріальному вигляді з використанням модифікованих критеріїв подоби:

$$Fr_{вц} = A' Re_{вц}^{a'} Z^{b'} S^{c'} \left( \frac{r}{r_0} \right)^{d'}, \quad (6)$$

$$T = A'' Re_{вц}^{a''} Z^{b''} S^{c''} \left( \frac{r}{r_0} \right)^{d''}, \quad (7)$$

Рівняння (6, 7) дозволяють визначати швидкість і час перебування рідини в зоні контакту. На основі математичної моделі отримана епюра розподілу швидкостей рідини в шарі насадки по радіусу контактної пристрою.

В цьому ж розділі приведено залежність для розрахунку гідравлічного опору РРА:

$$\Delta P = \Delta P_{об} \left[ 1 + C \left( \frac{L}{G} \right)^a \right], \quad (8)$$

$$\text{де } \Delta P_{o\bar{o}} = \Delta P_0 \left( 1 + K \frac{d_e}{\lambda_z l} \left( \frac{\omega r_{cep}}{w_{z.r_{cep}}} \right)^2 + \xi \frac{d_e}{\lambda_z l} \left( \frac{w_{z.видн}}{w_{z.r_{cep}}} \right)^2 \right); \quad (9)$$

$$\Delta P_0 = \lambda_z \frac{1}{d_e} \frac{\rho_z w_{z.r}^2}{2} \cdot r^2 \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{R} \right). \quad (10)$$

У виразі (9) комплекс  $K \frac{d_e}{\lambda_z l} \left( \frac{\omega r_{cep}}{w_{z.r_{cep}}} \right)^2$  являє собою модифікований критерій  $Z$ , який

дозволяє враховувати складову гідравлічного опору, що виникає під дією відцентрового поля.

Складова  $\xi \frac{d_e}{\lambda_z l} \left( \frac{w_{z.видн}}{w_{z.r_{cep}}} \right)^2$  враховує тертя ротора об газову фазову.

Встановлені закономірності розподілу рідкої фази в шарі насадки РРА дозволили одержати рівняння для визначення товщини плівки, яка складається з двох величин – статичної та динамічної – (11) та кількості утримуваної рідини (12) в залежності від режимних параметрів та конструктивних особливостей РРА:

$$\delta = \psi \zeta \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} + L \cdot \frac{\chi}{w_r} \cdot \frac{d_e}{4 f_r}, \quad (11)$$

$$\Delta = \delta_{cm} \pi h a (r^2 - r_0^2) + L \cdot t, \quad (12)$$

$$\text{де комплекс } \zeta = \left[ (1 + A) - \left( \frac{K_{oe} w_z^2}{\omega^2 r} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \right) \right]^{-0.5}; \quad \psi = 1.11 - \text{коефіцієнт, що враховує}$$

змочуваність насадки, її геометричні характеристики та властивості рідини;  $\chi$  – коефіцієнт, який враховує нерівномірність розподілу поля швидкостей по перетину плівки;  $a$  – питома поверхня насадки,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $A = 2(1 - K_{pn})$  – коефіцієнт, що враховує ступінь дії сил Коріоліса: для контактного пристрою виготовленого з сітки  $A = (1 + \varepsilon)$ , з бісеру –  $A = 0,67(2 + \varepsilon)$ .

Розглянуто механізм захлинання РРА та встановлені граничні режими роботи апарата. Отримано рівняння для визначення граничної частоти обертання ротору в залежності від режимних та конструктивних параметрів:

$$\frac{\omega_{zp} r_0}{w_{z.r_0}} = B \left( \frac{f_{r_0 \text{ вільн}}}{2(1 + A)} \right)^{0.5} \left( \frac{L}{G} \right)^b. \quad (13)$$



Визначено зв'язок геометричних розмірів контактної пристрою з розділовою та пропускною здатністю РРА. Виходячи з ефективності використання об'єму РРА встановлено нижню межу співвідношення  $\frac{R}{r_0}=2$ .

В третьому розділі дається опис експериментальної установки та методики дослідження гідродинаміки та масообміну РРА.

Лабораторна установка являє собою модель РРА з контактним пристроєм в вигляді перфорованого ротора, усередині якого розташовано шар насадки зі скляного бісеру або пакет регулярної насадки, виготовлений з металевої сітки у вигляді рулону навитого виток до витка. Ротор РРА мав наступні розміри: внутрішній діаметр – 55мм, зовнішній – 220мм, ширина – 50мм. Дослідження проводились з використанням насадок, які мали наступні характеристики: діаметр бісеру – 1.86мм, чарунка сітки – 1мм, діаметр дроту – 0.2мм. Максимальна похибка вимірювальних приладів не перевищувала 3.5%.

У четвертому розділі розглядаються гідродинамічні закономірності роботи РРА.

В результаті експериментальних досліджень гідравлічного опору РРА з незрошуваним ротором були отримані коефіцієнти рівнянь (9, 10):

в інтервалі  $123 < Re_z < 307$  залежність  $\lambda_z = f(Re_z)$  має вигляд:

для контактної пристрою з бісеру:  $\lambda_z = 965 Re_z^{-1}$ ; з сітки:  $\lambda_z = 1350 Re_z^{-1}$ . При подальшому збільшенні швидкості газу  $307 < Re_z < 675$  для бісеру –  $\lambda_z=3.6$ ; для сітки –  $\lambda_z=4.3$ .

$$K = 9.8 \left( \frac{\omega r_{cep}}{w_{z.r_{cep}}} \right)^{-0.74} ; \quad \xi = 1.12.$$

Результати експериментальних досліджень гідравлічного опору узагальнені в вигляді графічної залежності, яка представлена на (рис.3). При низьких обертах ротора відбувається накопичення рідини в зоні контакту (рис.4), що приводить до перекриття живого перетину шару насадки, і, відповідно, до росту гідравлічного опору та захливання апарату. Збільшення частоти обертання ротора приводить до росту відцентрових сил, що діють на рідину. Завдяки цьому рідка фаза переборює сили опору газу, і відбувається її продавлювання через шар насадки. За рахунок цього зменшується кількість утримуваної рідини і ступінь перекриття живого перетину контактної пристрою, що приводить до зменшення впливу зрошення на гідравлічний опір РРА.

Візуальні спостереження показали, що на гідродинамічну обстановку в РРА великий вплив має частота обертання ротора. При частотах обертання, які перевищують граничну більш ніж в п'ять разів, в контактному пристрої підтримується стійкий гідродинамічний режим (ділянка АВ

рис.3), який визначений як робочий. При зниженні частоти обертання ротора у внутрішній його частині спостерігається незначне накопичення рідини, що приводить до збільшення гідравлічного опору зрошуваного ротора в порівнянні із сухим. На графічній залежності (рис.3) даний режим відповідає автономній зоні – ділянці ВС. У крапці С відбувається інтенсивне накопичення рідини в контактному пристрої, що супроводжується збільшенням сил тертя фаз. Спостерігається різкий ріст гідравлічного опору, який супроводжується підвисанням рідини і захлинанням РРА (ділянка CD).

Аналіз експериментальних досліджень показує, що збільшення щільності зрошення  $\frac{L}{G} > 1 \cdot 10^{-3}$  приводить до збільшення гідравлічного опору пропорційно  $\left(\frac{L}{G}\right)^2$ .

Для контактної пристрою, виконаної з насипної насадки у вигляді бісеру так само як і для контактної пристрою з металевої сітки, в діапазоні частот обертання ротора  $\omega > 100$  рад/с і швидкостей пари  $w_{2.r_{сеп}} < 4$  м/с при  $1 \cdot 10^{-3} < \frac{L}{G} < 3 \cdot 10^{-3}$  вираз (8) має наступний вид:

$$\Delta P = \Delta P_{об} \left[ 1 + 0.72 \cdot 10^5 \left( \frac{L}{G} \right)^2 \right]. \quad (14)$$

Вплив ступеня зрошення контактної пристрою на величину гідравлічного опору враховується виразом (14) з точністю 95%.

Дослідження товщини плівки при різних швидкостях обертання ротора показали, що статична складова товщини плівки при кутовій швидкості  $\omega > 40$  рад/с залишається постійною (рис.4). При зменшенні частоти обертання ротора відбувається збільшення товщини плівки.

Для визначення граничних режимів роботи РРА в залежності від режимних параметрів отримане рівняння (13) в явному виді:

$$\frac{\omega_{2p} r_0}{w_{2.r_0}} = 110 \left( \frac{f_{r_0 \text{ вільн}}}{2(1+A)} \right)^{0.5} \left( \frac{L}{G} \right)^{0.32}. \quad (15)$$

Сталий режим роботи РРА настає при швидкості обертання ротора, яка перевищує граничну в (4 – 5) разів.

У п'ятому розділі розглядаються закономірності масообміну в РРА. Порівняння ефективності РРА при різній температурі флегми показало доцільність проведення процесу в неадіабатичному режимі (рис.5).

Дослідження ВОП дозволило визначити співвідношення зовнішнього та внутрішнього радіусів контактної пристрою як  $2 < \frac{R}{r_0} < 4$ .

Експериментальні дослідження залежності розділової здатності РРА від швидкості обертання ротора показало, що сталий режим роботи апарата спостерігається при робочих гідродинамічних режимах (рис.6).

Визначена верхня межа навантажень по газовій фазі, яка відповідає швидкості пари у внутрішньому перерізі контактного пристрою, рівній 8 м/с. Збільшення швидкості пари приводить до зниження ефективності апарата за рахунок виникнення бризковиносу.

Результати експериментальних досліджень залежності ефективності РРА від швидкості пари узагальнені у вигляді графічної залежності (рис.7). Критеріальна залежність визначена в наступному виді:

$$Nu = A Re_2^{0.85}, \quad (16)$$

де:  $A=2.7$  – для бісеру;  $A=6.2$  – для сітки.

В шостому розділі приведено результати дослідно-промислових випробувань РРА при розгонці ефіро-альдегідної фракції в умовах ДП “Будильський експериментальний завод”.

Для проведення досліджень у промислових умовах була розроблена і випробувана установка потужністю 40-45 дал/добу по ефіро-альдегідній фракції. Вона складається з двох РРА з використанням пакету регулярної насадки з металевої сітки з чарункою 1х1 мм, навитої в рулон виток до витка.

Гідравлічний опір апарата (0.4-0.6) кПа. Розділова здатність установки становила 29 теоретичних тарілок при висоті теоретичної тарілки 10 – 11 мм.

Дослідно-промислові іспити показали, що протягом тривалого часу безупинної роботи РРА зберігали стійкість і досить високу ефективність роботи. Застосування установки для розгонки ЕАФ, створеної на базі РРА дозволяє забезпечувати виділення етилового спирту з ЕАФ при значному зниженні габаритних розмірів устаткування і зниженні енергетичних витрат. Наведена техніко-економічна оцінка РРА і рекомендації до його розрахунку і проектування.

У додатках наведені результати експериментальних досліджень, блок-схема алгоритму інженерного розрахунку РРА та акт промислового випробування установки для розгонки ефіро-альдегідної фракції (ЕАФ).

## ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано можливість інтенсифікації процесу ректифікації в роторному масообмінному апараті з перфорованим ротором, усередині якого знаходиться контактний пристрій. Показано, що така конструкція забезпечує високу ефективність процесу, стійкість роботи апарата при малих габаритах.
2. Встановлені конструктивні параметри і режими роботи РРА.

3. Розкрито фізичну картину взаємодії фаз у відцентровому полі РРА в умовах однофазного і двофазного потоку через насадку різної конфігурації.
4. На основі аналізу і взаємодії фаз у відцентровому полі отримана математична модель руху рідкої фази через шар насадки в контактному пристрої.
5. На основі математичної моделі отримана епюра розподілу швидкостей по радіусу контактної пристрою.
6. На основі подібного перетворення диференціальних рівнянь руху рідини отримані два безрозмірних критерії, що дозволили одержати критеріальні рівняння, для визначення швидкості і часу перебування рідини в контактному пристрої.
7. Отримано залежність для визначення гідравлічного опору з урахуванням обертання ротора і щільності зрошення контактної пристрою.
8. Математична модель розподілу рідкої фази в шарі насадки розроблена, виходячи з припущення що плівка має два шари: статичний і динамічний. Отримано залежності для визначення товщини плівки і кількості утримуваної рідини.
9. Отримано залежність для визначення граничних режимів роботи РРА.
10. В результаті обробки експериментальних даних визначені робочі режими апарата, при яких частота обертання ротора перевищує граничну в п'ять разів.
11. Експериментальні дослідження масообмінних характеристик РРА в неадіабатичних умовах показали, що зниження температури флегми приводить до інтенсифікації процесу поділу в РРА.
12. Дослідження масообмінних характеристик апарата при використанні контактних пристроїв з бісеру і металевої сітки показало, більшу ефективність при застосуванні контактної пристрою з металевої сітки.
13. Результати експериментально-теоретичних досліджень були використані при проектуванні дослідно-промислової установки для розгонки ефіро-альдегідної фракції на ДП "Будильський експериментальний завод". Испити дослідно-промислової установки показали високу ефективність і усталену роботу при тривалій експлуатації.

#### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.

$r, r_0, R$  – радіус контактної пристрою: поточний, внутрішньої поверхні та периферії відповідно, м;  $h$  – ширина контактної пристрою, м;  $\Delta P, \Delta P_0$  – гідравлічний опір апарата та шару насадки, Па;  $\sum \bar{F}$  – результуючий вектор сил, що діють на рідину з боку навколишнього середовища і внутрішньої сили в'язкості, Н;  $F_{\text{ц}}$  – відцентрова сила інерції, Н;  $F_K$  – Коріолісова

сила інерції, Н;  $F_{он}$  – сила опору насадки, Н;  $F_{o2}$  – сила опору газової фази, Н;  $F_{рн}$  – сила, обумовлена реакцією насадки на дію Коріолісових сил, Н;  $F_{\epsilon}$  – сила в'язкісного тертя, Н;  $K_{он} = 0,5\lambda_p / d_e$  – коефіцієнт опору насадки, 1/м;  $K_{o2} = 0,5\lambda_2 / d_e$  – коефіцієнт опору газу, 1/м;  $K_{рн}$  – коефіцієнт реакції насадки на дію сили Коріоліса;  $\lambda_2, \lambda_p$  – коефіцієнт тертя фаз і рідини о насадку відповідно;  $\mu_p, \mu_2$  – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини та газу відповідно, Па·с;  $\nu_p, \nu_2$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини та газу відповідно, м<sup>2</sup>·с;  $\rho_p, \rho_2$  – щільність рідини і газу відповідно, кг/м<sup>3</sup>;  $m_p$  – маса елементарного об'єму рідини, кг;  $m_2$  – удавана маса, кг;  $w_r, w_{\phi}, w_z, w$  – радіальна, окружна, осьова складові та повне значення швидкості руху рідини, м/с;  $w'', w_{2,r}, w_{2,відн}$  – швидкість газу відносно рідини в контактному пристрої, радіальна складова швидкості газу в контактному пристрою та швидкість газу відносно обертового ротора, м/с;  $\omega, \omega_{2p}$  – кутова швидкість обертання ротора, рад/с;  $t$  – час, с;  $G, L$  – витрата газу та рідини, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta$  – кількість утримуваної в контактному пристрої рідини, м<sup>3</sup>;  $\delta, \delta_{cm}$  – товщина плівки рідини: повна величина та статична складова, м;  $\epsilon$  – порозність, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $d_e$  – еквівалентний діаметр насадки, м;  $K_L$  – коефіцієнт, що враховує перекриття перетину контактної пристрою рідиною;  $f_r$  – площа перетину контактної пристрою на радіусі  $r$ , м<sup>2</sup>;  $k_{\tau}$  – коефіцієнт, що враховує тертя ротора об пару і нерівномірність розподілу поля швидкостей пари по периферії ротора;  $h_y$  – висота одиниці переносу, м;  $D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії, м<sup>2</sup>/с; РРА – роторний ректифікаційний апарат; ВОП – висота одиниць переносу; КУР – кількість утримуваної рідини;

$$Re_{вц} = \frac{\omega r d_e}{\nu_p} \text{ – відцентровий критерій Рейнольдса; } Re_2 = \frac{w_2 d_e}{\nu_2} \text{ – критерій Рейнольдса для}$$

$$\text{газової фази, визначений для середнього перерізу контактної пристрою; } Nu = \frac{K d_e}{a D} \text{ – критерій}$$

$$\text{Нусельта; } Fr_{вц} = \frac{\omega^2 r^2}{w_r} \text{ – відцентровий критерій Фруда; } T = \omega t \text{ – безрозмірний час.}$$

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Лазненко Д.А., Пляцук Л.Д. Интенсификация процессов разделения углеводородного сырья.//Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. – Сумы. – 1998. – с.160.
2. Лазненко Д.А., Пляцук Л.Д., Стороженко В.Я. Движение жидкости в роторных теплообменниках аппаратах.//Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. – Сумы. – 1998. – с.166.
3. Лазненко Д.А. Высокоэффективные роторные ректификационные аппараты.//Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. – Сумы. – 1998. – с.177.
4. Пляцук Л.Д., Лазненко Д.А., Васькин Р.А. Математическая модель взаимодействия фаз в роторных аппаратах центробежного типа.// Вестник КПИ. К.: Машиностроение, 1999. – выпуск 36. т.2. – с. 480 – 486.
5. Пляцук Л.Д., Лазненко Д.О., Стороженко В.Я. Відцентровий тепломасообмінний апарат. Заявка №99010130 від 10.01.99.
6. Пляцук Л.Д., Лазненко Д.О. Відцентровий тепломасообмінний апарат. Заявка №99063483 від 22.06.99.
7. Пляцук Л.Д., Лазненко Д.А. Длина участка гидродинамической стабилизации при движении жидкости во вращающихся насадках. // Труды научно-технической конференции. Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов. Харьков, 1999. – с. 60 – 61.
8. Лазненко Д.О. Розподіл рідкої фази у контактному пристрої роторного ректифікаційного апарата. // Вестник КПИ. К.: Машиностроение, 2000. – выпуск 38. т.2. – с. 53 – 55.
9. Пляцук Л.Д., Шевченко О.С., Лазненко Д.О. Вирівнювання гідродинаміки насадок що обертаються. // Хімічна промисловість України. – 2000. – №5(40). – с. 6 – 8.
10. Пляцук Л.Д., Лазненко Д.О. Гідравлічний розрахунок роторного ректифікаційного апарата з затопленою насадкою. // Хімічна промисловість України. – №5(40). – с. 8 – 11.
11. Відцентровий тепломасообмінний апарат: деклараційний патент на винахід. №31145А. Україна, МПК В 01 D 3/30 / Л.Д.Пляцук, В.Я.Стороженко, Д.О.Лазненко. № 98073763; Заявлено 14.07.1998; Оpubліковано 15.12.2000, Бюл. №7-П.
12. Відцентровий тепломасообмінний апарат: деклараційний патент на винахід. №31655А. Україна, МПК В 01 D 3/30 / Л.Д.Пляцук, Д.О.Лазненко. № 98105374; Заявлено 13.10.1998; Оpubліковано 15.12.2000, Бюл. №7-П.

13. Лазненко Д.О., Майфат М.А. Дослідження масообміну та гідродинаміки РРА. // Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. – Сумы. – 2000. – вып.1. – с.250.
14. Лазненко Д.О., Майфат М.А. Неадіабатична ректифікація в РРА. // Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. – Сумы. – 2000. – вып.1. – с.251.
15. Лазненко Д.О., Осадчая Е.Н. Утилізація відходів виробництва етилового спирту. // Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. – Сумы. – 2001. вып.3. – с.36-38.
16. Відцентровий масообмінний апарат: деклараційний патент на винахід. №32806А. Україна, МПК В 01 D 3/30 / Л.Д.Пляцук, В.Я.Стороженко, Д.О.Лазненко. № 98042167; Заявлено 29.04.1998; Опубліковано 15.02.2001, Бюл. №1.

### АНОТАЦІЯ

Лазненко Д.О. Розробка і дослідження малогабаритних апаратів для процесів ректифікації.  
– Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08. – процеси та обладнання хімічних технологій. – Сумський державний університет, Суми, 2001.

Дисертацію присвячено питанням розробки і дослідження роторного ректифікаційного апарату (РРА) для поділу бінарних та псевдобінарних сумішей. На основі досліджень гідродинамічних закономірностей визначені граничні та робочі режими роботи апарату, встановлена їх залежність від геометричних характеристик.

Розроблена математична модель руху рідкої фази через шар насадки в контактному пристрою. Отримані залежності для визначення основних гідродинамічних і масообмінних характеристик РРА.

Результати роботи знайшли промислове впровадження при проектуванні дослідно-промислового зразка установки для разгонки ефіро-альдегідної фракції.

Ключові слова: гідродинамічні закономірності, коефіцієнт масовіддачі, відцентрове поле, математична модель.

### SUMMARY

Laznenko D.A. Development and investigation of the compact apparatuses for carrying out processes of rectification – manuscript.

Thesis for the academic degree technical science competition on the speciality 05.17.08 – Processes and equipment of the chemical technologies. Sumy state university, Sumy, 2001.

Thesis devoted by questionable in a development and investigation of the rotor rectifying apparatus (RRA), for separation bistream and pseudobistream mixes.

On the basis of investigation hydrodynamics regularity works apparatuses, by definite in limiting and operating condition works of the apparatus, set up their depending on geometrical performance of the contacting arrangement.

Developed mathematical model motion in liquid phases through layer of nozzle in contacting arrangement.

Received dependence for definition of the basic hydrodynamics's and masstransfer's characteristics RRA.

By the results of work's find out industrial use in the designing of experimental industrial model plant for distillation on the ether-aldehyde fraction's.

Key word's: hydrodynamics regularity, coefficient masstransfer, center of gravity fild, mathematical model.

## АННОТАЦИЯ

Лазненко Д.А. Разработка и исследование малогабаритных аппаратов для процессов ректификации. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08. – процессы и оборудование химической технологии. – Сумский государственный университет, г.Сумы, 2001г.

Диссертация посвящена вопросам разработки и исследования роторных ректификационных аппаратов (РРА) для разделения бинарных и псевдобинарных смесей. Детальные исследования процессов массообмена и гидродинамики двухфазных потоков в роторных ректификационных аппаратах с перфорированным ротором проведенные соискателем, позволили выполнить инженерные расчеты конструкции РРА, испытать его работу в производственных условиях и сделать выводы о целесообразности внедрения разработанной конструкции в производство для разделения углеводородного сырья.

Анализ работы и основных характеристик роторного ректификационного оборудования показал, что применительно к процессам тонкого разделения небольших объемов бинарных и псевдобинарных смесей наиболее пригодными являются роторные ректификационные аппараты с перфорированным ротором, внутри которого расположено контактное устройство. Изучение гидродинамической обстановки показало, что на основные гидродинамические характеристики



аппарата существенное влияние оказывает действие центробежного поля. Центробежное поле способствует организации устойчивых гидродинамических режимов работы аппарата и увеличению площади поверхности контакта фаз. Определены режимы работы аппарата. Наиболее эффективным является режим, при котором частота вращения ротора превышает предельную, определяемую из условий захлебывания, более чем в пять раз. Разработана математическая модель движения жидкости в контактном устройстве РРА. На основе подобного преобразования дифференциальных уравнений движения жидкости получены два безразмерных критерия. Предложен инженерный метод расчета гидравлического сопротивления РРА с учётом вращения ротора и плотности орошения контактного устройства, целесообразность которого подтверждена экспериментально. Математическая модель распределения жидкой фазы в контактном устройстве разработана исходя из допущения, что плёнка имеет два слоя: статический и динамический. Получено соотношение для расчета удерживающей способности насадки и расчета толщины пленки в контактном устройстве. Соискателем детально исследована кинетика массопереноса и получены значения коэффициентов массоотдачи в паровой фазе в неадиабатических условиях. Показано, что понижение температуры флегмы приводит к интенсификации процесса разделения в РРА. Выявлена зависимость коэффициента массоотдачи от режимных параметров. Предложено соотношение для их расчета. Исследована эффективность массообмена в РРА при использовании контактных устройств из бисера и сетки. Показано, что большая эффективность достигается при применении пакета регулярной насадки, изготовленной из металлической сетки, свернутой в рулон.

Результаты проведенных исследований были использованы при проектировании опытно-промышленной установки для разгонки эфирно-альдегидной фракции на Будыльском спиртзаводе. Испытания опытно-промышленного аппарата показали высокую эффективность и устойчивую работу при длительной эксплуатации.

Ключевые слова: гидродинамические закономерности, коэффициент массоотдачи, центробежное поле, математическая модель.

Підписано до друку 21.05.2001.  
Папір друк. №1.  
Умовн. фарбовідб. 1,18.  
Наклад 100 прим.

Формат 60x80  $\frac{1}{16}$   
Умовн. друк. арк. 1,1.  
Обл.-вид. арк. 1,51.  
Зам №207

---

“Ризоцентр” СумДУ  
40007, Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.